

**Сергій Васильович Коваленко<sup>1</sup>, Олексій Васильович Красножон<sup>2</sup>,  
Олександр Миколайович Хропатий<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, група АСД-122-23

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [kovalenkoptp10@gmail.com](mailto:kovalenkoptp10@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-6993-010X>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [wingcommander2011@gmail.com](mailto:wingcommander2011@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>

**Scopus Author ID:** 57190377188

<sup>3</sup>викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [alexhropatiy@gmail.com](mailto:alexhropatiy@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1979-4114>

**Scopus Author ID:** 57221684314

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПОКАЗІВ ЛІЧИЛЬНИКІВ ТЕПЛОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

*Запропонована стаття присвячена дослідженню архітектури інформаційної системи моніторингу даних з лічильників теплової енергії із застосуванням технологій Інтернету речей (IoT). Розглядаються ключові компоненти: шлюзова інфраструктура для передачі даних, протоколи та технології зв'язку (LoRaWAN, NB-IoT, MQTT), а також компоненти серверної частини для обробки, зберігання і візуалізації інформації. Наведено опис функціональних модулів та запропоновано алгоритми обробки даних у реальному часі. Проведено аналіз існуючих рішень, виділено недоліки та обґрунтовано вибір архітектурного підходу.*

**Ключові слова:** Інтернет речей; моніторинг теплової енергії; лічильники тепла; LoRaWAN; NB-IoT; MQTT; обробка даних; архітектура інформаційної системи.

*Рис.: 5. Бібл: 18.*

**Актуальність теми дослідження.** Запровадження систем дистанційного моніторингу споживання теплової енергії є одним із пріоритетних напрямів енергоменеджменту для підвищення ефективності використання ресурсів та зменшення експлуатаційних витрат. Зростання цін на паливно-енергетичні ресурси, а також необхідність скорочення викидів парникових газів змушують підприємства теплопостачання, ОСББ і керівників бюджетних установ впроваджувати інтелектуальні засоби контролю за використанням теплової енергії. Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT – Internet of Things) у сфері обліку та моніторингу лічильників тепла дозволяє автоматизувати процеси збору даних, своєчасно виявляти аварійні ситуації, а також оптимізувати тарифи та графіки подачі теплоносія. В умовах сучасних викликів енергоефективності, цифровізації мереж і переходу до «розумних» міст питання розробки надійних та масштабованих інформаційних систем моніторингу стає особливо актуальним.

**Постановка проблеми.** Попри широке розповсюдження електронних лічильників теплової енергії, у багатьох операторів теплопостачання відсутні єдині централізовані рішення для збору й аналізу даних у реальному часі. Основні проблеми полягають у такому:

- виробники лічильників використовують власні протоколи й формати передачі даних, що ускладнює їх інтеграцію в єдину систему;
- використання GSM/GPRS або інших традиційних технологій може призводити до затримок у передачі даних, високих експлуатаційних витрат і нестабільності з'єднань;
- при збільшенні кількості пристроїв (лічильників) значно зростають вимоги щодо пропускну здатності мережі та обчислювальних ресурсів серверної частини;
- передача конфіденційної інформації споживачів потребує надійних механізмів шифрування та автентифікації на кожному рівні;

– обмеженість лише стандартними звітами, тоді як потреба в аналітичній обробці великих обсягів історичних даних вимагає впровадження складніших алгоритмів (прогнозування, виявлення аномалій, побудова графіків).

Таким чином, створення інформаційної системи, здатної працювати із лічильниками тепла різних виробників, забезпечувати безперервний обмін даними у реальному часі, їх обробку, зберігання і візуалізацію, а також гарантування безпеки даних та зі здатністю до масштабування є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками вітчизняні та зарубіжні науковці приділяють значну увагу впровадженню IoT-рішень у сфері енергоменеджменту, зокрема:

1. IoT-архітектури для енергетичного моніторингу. У джерелах [1-3] наведено огляд різноманітних IoT-платформ (Azure IoT, AWS IoT, Google Cloud IoT), описано їх можливості щодо збору даних із лічильників, а також інтеграції із існуючими SCADA-системами. Дослідження показують, що застосування хмарних технологій дозволяє забезпечити майже необмежене сховище даних, засоби обробки поточних даних (stream processing).

2. Протоколи зв'язку для IoT у сфері ЖКГ. У роботах [4, 5] розглянуто переваги та недоліки таких технологій, як LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox та LTE-M для комунікації із лічильниками теплової енергії. Зокрема, технологія LoRaWAN демонструє низьке енергоспоживання та великий радіус дії, але обмежену пропускну здатність, тоді як NB-IoT забезпечує хороший зв'язок у приміщеннях, але вимагає підтримки оператором мережі мобільного зв'язку.

3. Безпека в IoT-мережах. Дослідження [6, 7] показали, що впровадження стандартизованих механізмів захисту (TLS/DTLS, MQTT over TLS, використання сертифікатів) є обов'язковим для запобігання несанкціонованому доступу до даних. Автори наголошують на необхідності використання засобів автентифікації на основі PKI (Private Key Infrastructure) та актуалізації прошивок, що підвищує стійкість системи до кіберзагроз.

4. Методи обробки та зберігання даних. У статтях [8-10] описано рішення на базі NoSQL-сховищ (MongoDB, InfluxDB) для зберігання великих масивів метрологічних даних із можливістю швидкого запису та читання. Додатково наведено приклади використання поточних систем обробки (Apache Kafka, Apache Flink) для агрегації і попереднього аналізу даних у реальному часі.

5. Візуалізація і аналітика. У роботах [11, 12] розглянуто інструменти інформаційних панелей (Grafana, Kibana, Power BI) та механізми машинного навчання для виявлення аномалій та прогнозування споживання енергії. Автори відзначають, що регулярне використання аналітичних звітів допомагає оптимізувати витрати на теплопостачання і вчасно виявляти витіки теплоносія.

6. Інформаційні системи для ЖКГ в Україні. У [13] оцінено існуючі рішення українських розробників щодо моніторингу лічильників тепла та холодної води. Зазначено, що більшість систем не є повністю масштабованими та не інтегруються з іншими аналітичними платформами, а часто орієнтовані лише на окремі протоколи (Modbus, MBus).

Загалом аналіз останніх публікацій підтверджує, що питання побудови універсальної та безпечної IoT-інфраструктури для моніторингу теплової енергії не є повністю закритим, а отже, потребує подальшого наукового та прикладного дослідження.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на значний прогрес у сфері IoT-рішень, залишаються відкритими наступні проблеми:

1. Уніфікація форматів даних для лічильників різних виробників. Відсутність єдиного підходу до структури пакетів даних ускладнює процес їх обробки та масштабування системи.

2. Гнучка архітектура шлюзової частини. Необхідно дослідити можливість одночасної підтримки декількох стандартів (LoRaWAN, NB-IoT, Ethernet) з автоматичним перемиканням залежно від умов мережі.

3. Оптиміальні стратегії енергозбереження для автономних вузлів вимірювання. У більшості досліджень аналізуються індивідуальні рішення, але відсутні загальні рекомендації щодо конфігурації периферійних пристроїв з урахуванням особливостей клімату та рельєфу.

4. Інтелектуальна аналітика на рівні граничних обчислень (Edge Computing). Потрібно оптимізувати алгоритми первинної обробки даних (фільтрація, агрегація) на самому пристрої або шлюзі, щоб зменшити навантаження на канал зв'язку та обчислювальний вузол.

Таким чином, виникає потреба в дослідженні моделей інформаційної системи та вибір тієї яка б враховувала зазначені недоліки й могла б бути адаптована до різних умов експлуатації.

**Мета статті.** Метою даної статті є обґрунтування архітектури інформаційної системи моніторингу даних, що отримуються від лічильників теплової енергії на основі технології Інтернету речей, яка забезпечить:

- уніфікований збір даних від пристроїв різних виробників за допомогою шлюзів із підтримкою технологій LoRaWAN, NB-IoT, Ethernet та MQTT;
- надійну передачу даних від пристроїв до серверної частини із мінімальною затримкою та гарантією доставки;
- обробку і зберігання великих обсягів метрологічної інформації із можливістю гнучкого масштабування;
- захист даних і безпеку системи на всіх рівнях (пристрій, шлюз, сервер, хмарний сервіс);
- інструменти аналітики та візуалізації, що дозволять у реальному часі відстежувати споживання теплової енергії, виявляти аномалії та прогнозувати навантаження.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо основні архітектурні елементи (шари), із яких складається типова багаторівнева система моніторингу приладів обліку теплової енергії, яку зображено на рисунку 1.

Шар вимірювальних пристроїв та сенсорів (Device Layer) складається із:

- електронних лічильників теплової енергії з інтерфейсом MBus/RS485;
- додаткових безконтактних датчиків (температури, тиску, витрати теплоносія) для розширеної аналітики;
- вбудованих модулів зв'язку (LoRa, NB-IoT, LTE-M або Ethernet) та мікроконтролерів (STM32, ESP32, nRF52) із підтримкою протоколу MQTT.

Шлюзовий шар (Gateway Layer) містить у собі:

- шлюзи із технологією LoRaWAN (Log Range Wide Area Network) для підключення великої кількості пристроїв із малим енергоспоживанням;
- модулі NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) для підвищення надійності з'єднання в умовах міської забудови;
- Ethernet-шлюзи для прямого підключення лічильників до локальної мережі.

Шлюзи виконують роль проміжного вузла, агрегують дані від пристроїв, здійснюють попередню обробку (Edge Computing), шифрують пакети й передають їх у хмару або локальний сервер.

Мережевий шар (Communication Layer) представлено:

- протоколами зв'язку LoRaWAN, NB-IoT;
- протоколом MQTT (Message Queue Telemetry Transport), що забезпечує обмін повідомленнями «публікація/підписка»;
- протоколами TLS/DTLS для шифрування даних у транспортному шарі;

- брокер MQTT (наприклад, Mosquitto або EMQX) для маршрутизації повідомлень;
  - модулі обробки реального часу (Apache Kafka, Apache Flink, чи локальні сервіси на основі Node.js);
  - бази даних: Time-series DB (InfluxDB, TimescaleDB) для зберігання метрологічних даних із записами (від 1 запису/хвилину до 1 разу/секунд) та NoSQL (MongoDB) для зберігання довідкових даних (інформація про прилади, користувачів, геодані).
- Прикладний (аналітичний і візуалізаційний) шар (Applied Layer) утворюють:
- мікросервіси для реалізації бізнес-логіки (Java, Node.js, Python/Flask);
  - DWH (Data Warehouse) для накопичення агрегаційних даних;
  - інформаційні панелі (Grafana, Power BI, Tableau) для візуалізації трендів споживання, звітів про витрати, прогнозів тощо.
  - мобільний і вебінтерфейси для кінцевих користувачів (React, Angular).

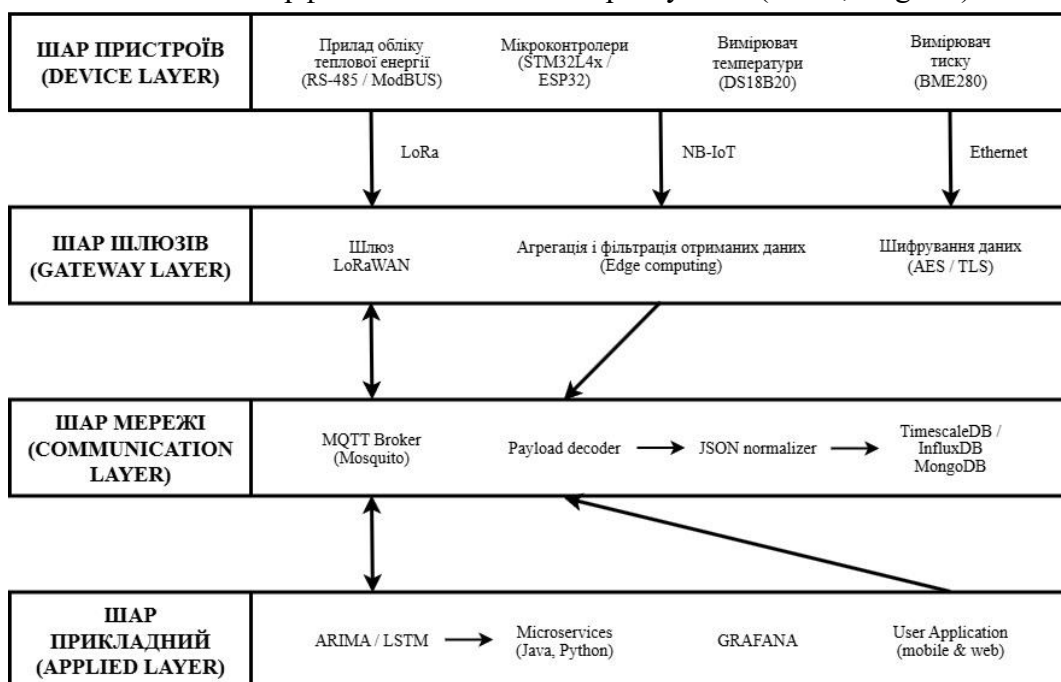


Рис. 1. Архітектурна система моніторингу показів лічильників теплової енергії  
Джерело: отримано авторами.

**Сенсорні модулі та пристрої збору даних.** Для реалізації шару Device Layer запропоновано використовувати комерційні теплові лічильники із відкритим інтерфейсом MBus або RS485. Структуру сенсорного модуля показано нижче, на рис. 2.

Мікроконтролер (MCU) STM32L4x або ESP32:

- ESP32 має інтегрований Wi-Fi/Bluetooth та можливість розширення LoRa або NB-IoT модулями;
- STM32L4x має низьке енергоспоживання, достатньо периферії (UART, I2C, ADC) для підключення датчиків.

Модулі зв'язку:

- LoRa SX1276 (868 МГц) для передачі пакетів розміром до 256 байт з дальністю до 5 – 10 км у сільській місцевості;
- NB-IoT (modem Quectel BC95) для підключення до мережі мобільного оператора: мінімальна затримка 1–2 секунди; підтримка міграції між базовими станціями; низьке енергоспоживання в режимі очікування (Stand-by) (< 10 мкА).

Датчики. Окрім вбудованого вимірювача об'єму теплоносія, пропонується інсталиувати:

1. Температурний датчик DS18B20 (з абсолютною похибкою у  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), для точного цифрового вимірювання температури в широкому діапазоні (від  $-55^\circ\text{C}$  до  $+125^\circ\text{C}$ ) у різних умовах, зокрема у вологих середовищах завдяки водонепроникному корпусу.

2. Датчик витрати (оптичний або ультразвуковий) для уточнення даних у критичних зонах.

Усі датчики під'єднуються до MCU через шину I2C (BME280), 1-wire (DS18B20) або ADC (аналого-цифровий перетворювач) для ультразвукового датчика.

Для забезпечення автономності сенсорного модуля пропонується використовувати акумуляторні батареї LiPo (3,7 В, 2000 мАг) із фотоелектричним перетворювачем енергії потужністю 5 Вт для підтримки автономності.

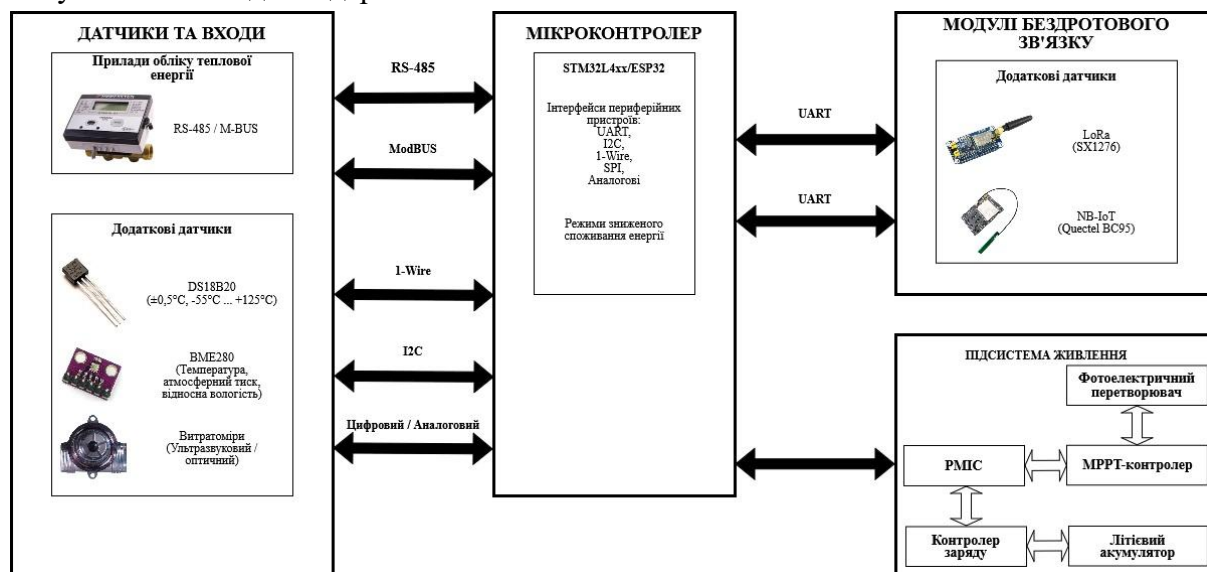


Рис. 2. Структурна сенсорного модуля системи моніторингу показів лічильників теплової енергії

Джерело: отримано авторами.

Проведемо розрахунок часу автономної роботи запропонованого сенсорного модуля. Середній струм споживання пристрою ( $I_{avg}$ ) з урахуванням всіх ключових робочих режимів можна визначити за формулою:

$$I_{avg} = \frac{I_{sl} \cdot T_{sl} + I_{act} \cdot T_{act} + I_{tx} \cdot T_{tx}}{T_{cycle}}, \tag{1}$$

де  $I_{sl}$  – струм в режимі зниженого енергоспоживання (сну);

$I_{act}$  – струм в режимі активного прийому даних;

$I_{tx}$  – струм в режимі активної передачі даних через NB-IoT/LoRa;

$T_{sl}$  – час перебування в режимі зниженого енергоспоживання;

$T_{act}$  – час перебування в режимі активного прийому даних;

$T_{tx}$  – час перебування в режимі активної передачі даних;

$T_{cycle}$  – загальний час однієї ітерації роботи модуля.

Припустимо, що сенсорний модуль здійснює передачу необхідних параметрів раз на 15 хвилин (тобто  $T_{cycle}$  складає 900 с). При цьому,  $T_{sl}$  становить 893 с,  $T_{act} - 5$  с і  $T_{tx} - 2$  с,  $I_{sl}$  складає 1,5 мА,  $I_{act} - 25$  мА,  $I_{tx} - 120$  мА. Тоді, згідно з (1), отримаємо:

$$I_{avg} = \frac{1,5 \cdot 893 + 25 \cdot 5 + 120 \cdot 2}{900} = \frac{1704,5}{900} \approx 1,893(8). \quad (2)$$

Як видно із (2), середній струм споживання сенсорного модуля складає приблизно 1,9 мА. Якщо обрати акумулятор ємністю 2000 мАг, теоретичний час автономної роботи (Т) складатиме:

$$T = \frac{2000}{1,9} \approx 1052,63 год \approx 43,86 д\bar{b}. \quad (3)$$

З урахуванням саморозряду акумулятора, енергетичних втрат на перетворення напруги та інших видів втрат, зазначений у (3) час автономної роботи буде явно меншим. Однак проведений розрахунок дозволяє обґрунтовано стверджувати, що гарантований час повністю автономії роботи модуля (за відсутності сонячної генерації) складатиме 30 д\bar{b}.

**Протоколи зв'язку та шлюзова інфраструктура.** Шлюзи виконують роль проміжного елемента між групою сенсорних вузлів та серверною частиною. Вибір технологій комунікації ґрунтується на таких критеріях: дальність, пропускна здатність, вартість обслуговування, енергоспоживання.

LoRaWAN працює у частотному діапазоні 868 МГц (ЄС) із шириною каналу у 125 кГц. Переваги: передача даних у відкритій місцевості до 10 км; низьке енергоспоживання пристроїв класу А та В; підтримка масштабування до десятків тисяч вузлів.

Принцип роботи LoRaWAN-мережі є такими [14]:

1. Сенсорний вузол формує дані (температура, витрата, тиск, ідентифікатор лічильника) й шифрує їх за допомогою AES-128.
2. LoRa-модуль передає зашифрований пакет на найближчий шлюз (базову станцію).
3. Шлюз отримує сигнал, додає метадані (RSSI, SNR, часову мітку) та надсилає через Ethernet або 4G/LTE канал до локального сервера або хмарного брокера LoRaWAN (TheThingsNetwork, ChirpStack).
4. Брокер здійснює демодельовання, автентифікацію пристрою, а потім передає чистий набір даних до MQTT-брокера для дальшої обробки.

NB-IoT (NarrowBand-IoT) – технологія мобільного зв'язку, що використовує вузьку смугу (200 кГц). Переваги: інтеграція в мережі GSM/UMTS/LTE операторів; краща проникність сигналу у приміщення; вища надійність доставки повідомлень.

LTE-M (Cat-M1) забезпечує вищу швидкість передачі (до 1 Мбіт/с), проте витрати енергії дещо більші, ніж у NB-IoT. Рекомендовано використовувати NB-IoT для малочастотних передавань (1 запис/10 хвилин) і LTE-M для більш частих оновлень, наприклад, в режимі реального часу.

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) – легкий протокол «публікація/підписка» на базі TCP/IP. Для передачі даних зі шлюзу до серверного кластера використовується MQTT over TLS: порт 8883 (TLS) для безпечного зв'язку; автентифікація за допомогою ключа клієнта (client ID) та пароля або сертифікатів.

MQTT-брокер (Mosquitto чи EMQX) отримує повідомлення і публікує їх у внутрішню чергу обробки.

Оскільки комунікаційні стандарти (MQTT, LoRaWAN) забезпечують лише транспортування даних, в архітектуру системи (рисунок 1) впроваджено Payload Decoder. Він автоматично перетворює вхідні бінарні пакети (Hex) пропрієтарних форматів конкретних виробників лічильників (наприклад, M-Bus) в уніфікований формат JSON.

Отримані через MQTT дані потрапляють у модуль Stream Processor (реалізований, наприклад, на базі Apache Kafka + Kafka Streams або Apache Flink). В цьому модулі вирішуються завдання:

- фільтрація шумових пакетів;
- агрегація даних у часові інтервали (наприклад, обчислення середньої температури за одну годину);
- маркування даних тегами (з геолокацією, типом приміщення, категоріями споживання);
- виявлення аномалій за простими пороговими алгоритмами.

Сховище даних і управління метаданими:

1. Time-series DB (InfluxDB). Оптимізована для швидкого запису та сканування за часовими зрізами. Дозволяє зберігати мільйони записів на день для кожного регіону.

2. NoSQL (MongoDB). Зберігає довідкову інформацію про прилади, користувачів, налаштування зон (географічні координати, назви будинків), профілі споживання (квартири, котельні).

Для розподіленої роботи баз даних застосовано реплікацію (кластери InfluxDB Enterprise, MongoDB Replica Set) і шардінг (множинні шарди для Time-series DB), що забезпечує високу доступність та відмовостійкість.

**Аналітичні алгоритми та модулі машинного навчання.** Для реалізації інтелектуальних функцій у системі розгорнуто окремий мікросервіс на базі Python (FastAPI). Він отримує нормалізовані дані у форматі JSON безпосередньо від JSON Normalizer, що забезпечує незалежність аналітики.

Мікросервіс виконує такі ключові завдання:

1. Прогнозування споживання. Для реалізації короткострокового прогнозування навантаження у систему інтегровано моделі ARIMA (для стабільних лінійних трендів) та нейромережі LSTM (для складних патернів). Критично важливим етапом перед навчанням моделей є автоматичне очищення історичних даних від шумів та аномалій (на шарі Stream Processor), що суттєво підвищує точність. Експериментальна верифікація моделей на тестовій вибірці (рис. 3) продемонструвала високу ефективність обраного підходу. Середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE) склала 4,2–4,8%.

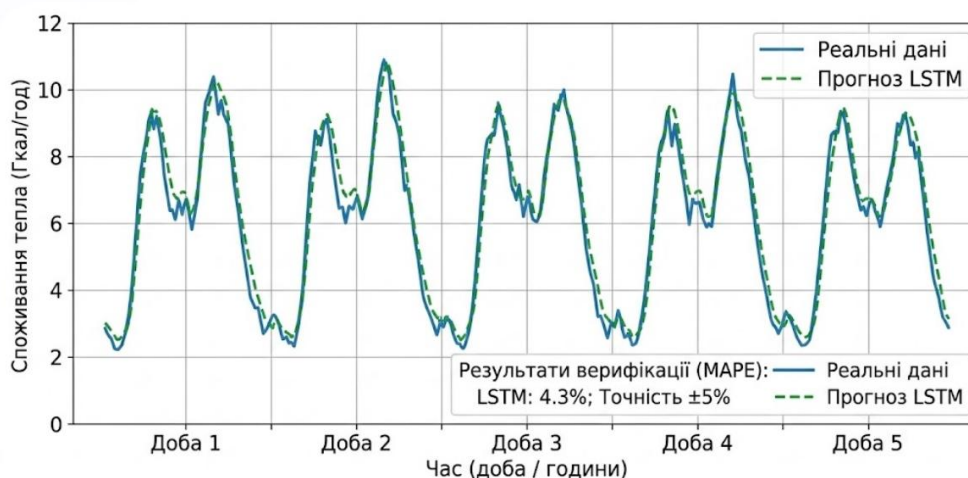


Рис. 3. Порівняння реальних та прогнозованих даних споживання тепла на моделі LSTM  
Джерело: отримано авторами.

2. Виявлення витоків та аномалій. Використання алгоритмів *K-means* для кластеризації типових профілів споживання і виявлення “аномальних” патернів (наприклад, різке зростання витрати теплоносія без зміни температури).

3. Оптимізація режимів роботи котелен. Розрахунок рекомендованої температури подачі для тепlopунктів, виходячи з прогнозованого попиту, поточної зовнішньої температури та динамічних тарифів.

Бази моделей зберігаються у форматі *Pickle* (скрипти *Python*), завантажуються в оперативну пам'ять при запуску сервісу й оновлюються автоматично за розкладом (один раз на добу) через механізм *CI/CD* (*GitLab CI*).

**Віртуалізація та масштабування.** Для забезпечення гнучкості, систему розгорнуто в контейнерах *Docker* (компоненти: *Mosquitto*, *Kafka*, *Zookeeper*, *Kafka Streams*, *InfluxDB*, *MongoDB*, мікросервіси *Python*). Розподіл контейнерів по вузлах кластера виглядає наступним чином:

1. *AUTO-SCALING* (*Horizontal Pod Autoscaler*). Тут активуються додаткові репліки сервісів згідно з навантаженням *CPU* або обсягу вхідного потоку повідомлень.

2. Резервне копіювання (*Backups*): щоденне зберігання вмісту БД; резервних копій у *S3*-сумісному сховищі.

Цей підхід забезпечує можливість обслуговувати одночасно до 50 000 активних пристроїв без втрати швидкодії.

З метою перевірки здатності підтримувати стабільну роботу системи при заявленому навантаженні було проведено навантажувальний тест. Тест проходив на трьох потужних віртуальних серверах, які працювали спільно. Щоб уникнути збоїв, усі частини системи було продубльовано. Налаштування цієї перевірки наведено нижче в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри сценарію навантажувального тестування

Параметр	Значення	Коментар
Інструмент тестування	Locust v2.15	Імітація розподіленого навантаження
Протокол зв'язку	MQTT через TCP	Базовий транспорт для сенсорів
Кількість імітованих пристроїв	50 000	Цільове навантаження
Темп приросту пристроїв	~13.8 пристроїв/с	Лінійне зростання до максимуму за 60 хв
Розмір корисного навантаження	150 байт	Типовий JSON-пакет
Інтервал відправки даних	900 с (15 хв)	Стандартний режим
Сумарний вхідний потік	~55.5 повідомлень/с	Розрахункове навантаження на брокер

Джерело: отримано авторами.

Сценарій дозволив створити технічно обґрунтоване навантаження, яке відповідає реальним умовам експлуатації масової системи моніторингу.

Основною метою тестування було визначення динаміки змін часу відгуку системи та споживання ресурсів при лінійному зростанні кількості пристроїв. Результати верифікації наведені на рис. 4.

При лінійному зростанні кількості пристроїв пропускна здатність також зростає лінійно, досягаючи стабільного значення ~55-56 повідомлень/с. При цьому середня затримка MQTT-брокера при обробці вхідних повідомлень залишається стабільною і при максимальному навантаженні складає ~180 мс, що знаходиться значно нижче критичного порогу у 250 мс.

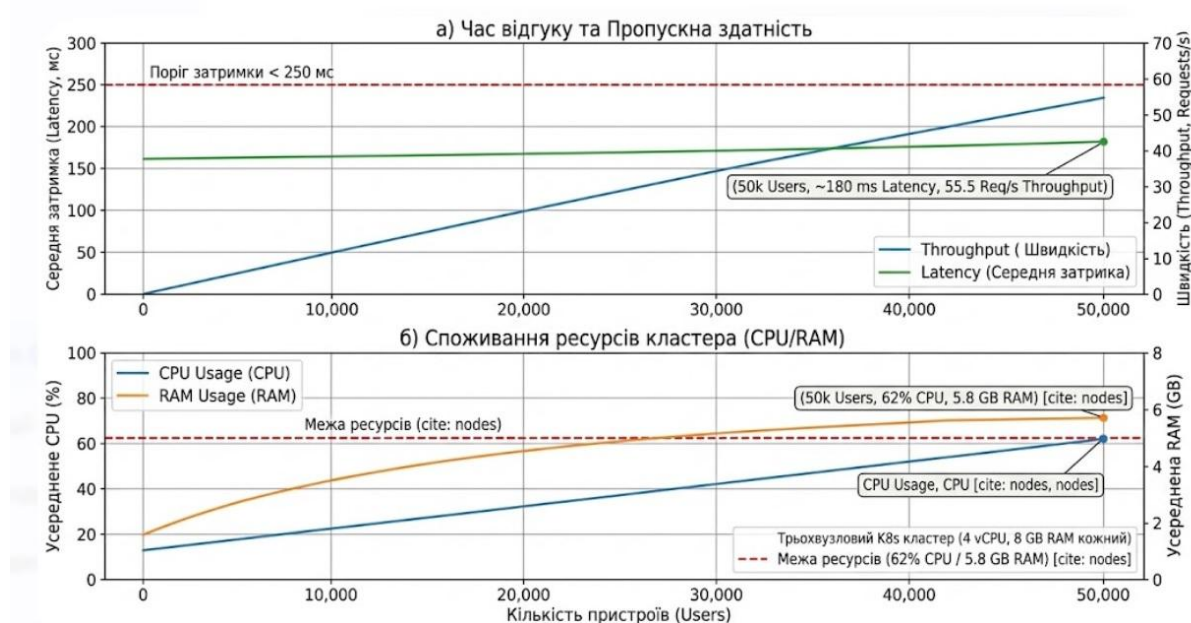


Рис. 4. Динаміка продуктивності системи при лінійному зростанні навантаження до 50 000 пристроїв:

- а – середня затримка (Latency) та пропускна здатність;
- б – усереднене споживання ресурсів кластера (CPU/RAM)

Джерело: отримано авторами

Споживання ресурсів зростає кореляційно до кількості пристроїв. При 50 000 пристроїв усереднене завантаження CPU по кластеру складає ~62 %, а використання RAM – приблизно 5,8 ГБ (що становить близько 72,5 % від доступних 8 ГБ на вузол). Важливо, що динаміка RAM показує стабілізацію без ознак витоків пам'яті.

Відсоток втрачених пакетів залишався нульовим протягом усього 60-хвилинного тесту.

Отримані дані експериментально підтверджують ефективність обраної мікросервісної архітектури та оркестрації контейнерів, доводячи її здатність масштабуватися до 50 000 пристроїв без втрати швидкодії.

**Інтерфейси користувача та візуалізація даних.** Користувацький інтерфейс та візуалізація даних в подальшому будуть розроблені із використанням інструментів Grafana та React з D3.js для забезпечення користувачів інформацією, включаючи оглядові панелі, детальні дані пристроїв, аналітику та систему оповіщень.

**Висновки.** За результатами дослідження інформаційної системи моніторингу даних з лічильників теплової енергії на основі технології Інтернету речей, можна зробити наступні висновки:

1. Уніфікація протоколів. Використання LoRaWAN і NB-IoT для передачі даних дозволяє інтегрувати пристрої різних виробників із єдиною системою збору.
2. Гнучкість та масштабованість. Завдяки контейнеризації та оркестрації Kubernetes система може обслуговувати десятки тисяч пристроїв без втрати продуктивності.
3. Безпека даних. Реалізація MQTT over TLS, шифрування на периферії AES-128 і централізована система керування сертифікатами гарантують цілісність та конфіденційність інформації.
4. Аналітика та прогнозування. Використання моделей машинного навчання для прогнозування споживання із похибкою у  $\pm 5\%$  дозволяє оптимізувати режими роботи котелень і знизити витрати енергії на 8-10 %.
5. Економічна ефективність. Автономні сенсорні модулі з режимом Deep Sleep і сонячними панелями забезпечують безперебійне функціонування до 30 днів без підзарядки, що зменшує експлуатаційні витрати на обслуговування обладнання.

**Список використаних джерел**

1. Nico Rothämel Managing Director, Wärmeversorgung Sollstedt GmbH OPTIMIZE DISTRICT HEATING NETWORK–REDUCE CO<sub>2</sub> EMISSIONS AND COSTS (n.d.). URL: <https://www.diehl.com/metering/en/products-solutions/solutions/heating-cooling-solutions/fernwaerme-effizienter-bereitstellen-energie-forcast-management/>.
2. Zhou, Q., Peng, W., Zhang, Q., & Mao, Q. (2020). Security and privacy for smart IoT: Current solutions and future directions. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(6), 4842–4854. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2964052>.
3. Sharma, B. K. (2025). Internet of Things (IoT) systems: A survey of platforms, protocols, and application frameworks. *Journal of Global Research in Multidisciplinary Studies*, 1(10), 24–39.
4. Mahamudul Hasan. (n.d.). *ESP32 LoRaWAN Gateway tutorial with sensor node: Example code included*. Embedded There. <https://embeddedthere.com/esp32-lorawan-gateway-tutorial-with-sensor-node-connecting-to-thingspeak/>.
5. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N., & Soltan, A. (2023). Internet of Things: A comprehensive overview on protocols, architectures, technologies, simulation tools, and future directions. *Energies*, 16(8), Article 3465. <https://doi.org/10.3390/en16083465>.
6. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2022). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 216, Article 109246. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109246>.
7. Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2021). Industrial Internet of Things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 81, Article 106522. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>.
8. Xu, L. D., Lu, Y., & Li, L. (2023). Embedding intelligence in Internet of Things: Data processing and storage perspectives. *IEEE Industrial Informatics Magazine*, 17(2), 6–17. <https://doi.org/10.1109/MII.2022.3211516>.
9. Marjani, M., Nasaruddin, F., Gani, A., Karim, A., Hashem, I. A. T., Siddiqa, A., & Yaqoob, I. (2021). Big IoT data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges. *IEEE Access*, 9, 149234–149262. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2689040>.
10. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2021). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), 1125–1137. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>.
11. Batty, M., Hudson-Smith, A., Milton, R., & Crooks, A. (2022). Visual analytics for urban digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(5), 1265–1282. <https://doi.org/10.1177/23998083211046769>.
12. Sodhro, A. H., Pirbhulal, S., Luo, Z., & de Albuquerque, V. H. C. (2021). Artificial intelligence driven mechanisms for edge computing-based IoT applications. *IEEE Access*, 9, 113785–113806. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104313>.
13. Kozlovskiy, O. M., & Petrova, S. V. (2021). Analiz system monitoringu lichylnykh resursiv dlia obiednanykh terytorialnykh hromad Ukrainy [Analysis of resource meter monitoring systems for united territorial communities of Ukraine]. *Enerhetyka ta Efektyvnist [Energy and Efficiency]*, (3), 45–53.
14. Teddy Caroni. (2025, February 28). *LoRaWAN: Fonctionnement, avantages et applications clés* [LoRaWAN: Operation, advantages and key applications]. BTIB. <https://www.btib.fr/lorawan-fonctionnement-avantages-applications>.

**References**

1. Nico Rothämel Managing Director, Wärmeversorgung Sollstedt GmbH OPTIMIZE DISTRICT HEATING NETWORK–REDUCE CO<sub>2</sub> EMISSIONS AND COSTS (n.d.). URL: <https://www.diehl.com/metering/en/products-solutions/solutions/heating-cooling-solutions/fernwaerme-effizienter-bereitstellen-energie-forcast-management/>.
15. Zhou, Q., Peng, W., Zhang, Q., & Mao, Q. (2020). Security and privacy for smart IoT: Current solutions and future directions. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(6), 4842–4854. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2964052>.
16. Sharma, B. K. (2025). Internet of Things (IoT) systems: A survey of platforms, protocols, and application frameworks. *Journal of Global Research in Multidisciplinary Studies*, 1(10), 24–39.

17. Mahamudul Hasan. (n.d.). *ESP32 LoRaWAN Gateway tutorial with sensor node: Example code included*. Embedded There. <https://embeddedthere.com/esp32-lorawan-gateway-tutorial-with-sensor-node-connecting-to-thingspeak/>.
18. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N., & Soltan, A. (2023). Internet of Things: A comprehensive overview on protocols, architectures, technologies, simulation tools, and future directions. *Energies*, 16(8), Article 3465. <https://doi.org/10.3390/en16083465>.
19. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2022). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 216, Article 109246. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109246>.
20. Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2021). Industrial Internet of Things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 81, Article 106522. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>.
21. Xu, L. D., Lu, Y., & Li, L. (2023). Embedding intelligence in Internet of Things: Data processing and storage perspectives. *IEEE Industrial Informatics Magazine*, 17(2), 6–17. <https://doi.org/10.1109/MII.2022.3211516>.
22. Marjani, M., Nasaruddin, F., Gani, A., Karim, A., Hashem, I. A. T., Siddiq, A., & Yaqoob, I. (2021). Big IoT data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges. *IEEE Access*, 9, 149234–149262. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2689040>.
23. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2021). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), 1125–1137. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>.
24. Batty, M., Hudson-Smith, A., Milton, R., & Crooks, A. (2022). Visual analytics for urban digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(5), 1265–1282. <https://doi.org/10.1177/23998083211046769>.
25. Sodhro, A. H., Pirbhulal, S., Luo, Z., & de Albuquerque, V. H. C. (2021). Artificial intelligence driven mechanisms for edge computing-based IoT applications. *IEEE Access*, 9, 113785–113806. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104313>.
26. Kozlovskiy, O. M., & Petrova, S. V. (2021). Analiz system monitorynhu lichylnykiv resursiv dlia obiednanykh terytorialnykh hromad Ukrainy [Analysis of resource meter monitoring systems for united territorial communities of Ukraine]. *Enerhetyka ta Efektyvnist [Energy and Efficiency]*, (3), 45–53.
27. Teddy Caroni. (2025, February 28). *LoRaWAN: Fonctionnement, avantages et applications clés* [LoRaWAN: Operation, advantages and key applications]. BTIB. <https://www.btib.fr/lorawan-fonctionnement-avantages-applications>.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.01.2026

UDC 004.03:004.9

**Serhii Kovalenko<sup>1</sup>, Oleksii Krasnozhon<sup>2</sup>, Oleksandr Khropatyi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Postgraduate student of the Department of Information and Computer Systems, group ASD-122-23  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [kovalenkopt10@gmail.com](mailto:kovalenkopt10@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-6993-010X>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [wingcommander2011@gmail.com](mailto:wingcommander2011@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>

**Scopus Author ID:** 57190377188

<sup>3</sup>Lecturer, Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [alexhropaty@gmail.com](mailto:alexhropaty@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1979-4114>. **Scopus Author ID:** 57221684314

## INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING DATA FROM HEAT ENERGY METERS BASED ON THE INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY

*The proposed article is devoted to the study of the architecture of an information system for monitoring data from heat energy meters using Internet of Things (IoT) technologies.*

*The implementation of remote monitoring systems for thermal energy consumption is currently one of the priority directions in energy management aimed at increasing resource efficiency and reducing operational costs. In the face of rising fuel and energy prices, as well as the global necessity to reduce greenhouse gas emissions, heat supply enterprises and facility*

managers require intelligent tools to control energy usage. The integration of Internet of Things (IoT) technologies allows for the automation of data collection processes, timely detection of accidents, and optimization of heating supply schedules. Therefore, the development of reliable, secure, and scalable information systems for monitoring acts as a critical task for the modernization of municipal infrastructure and the transition to "smart city" concepts.

Despite the widespread use of electronic heat meters, a significant problem remains the lack of unified centralized solutions for real-time data collection and analysis. Existing systems often face challenges such as the incompatibility of proprietary protocols from different meter manufacturers, high operational costs of traditional GSM/GPRS communications, and insufficient scalability. Furthermore, ensuring the security of confidential consumer data and processing large volumes of historical information for predictive analytics requires more advanced architectural approaches than those currently available on the market.

The objective of this article is to justify and design the architecture of an information system for monitoring data received from heat energy meters based on IoT technology. The system aims to ensure unified data collection from heterogeneous devices, reliable transmission with minimal latency, secure processing, and storage of large data volumes, as well as providing tools for visualization and forecasting of heat consumption.

The study proposes a multi-level system architecture consisting of a Device Layer, Gateway Layer, Network Layer, and Application Layer. At the device level, the integration of commercial heat meters with microcontrollers (STM32, ESP32) and additional sensors (DS18B20) is proposed. To ensure energy efficiency and wide coverage, a hybrid communication approach is utilized: LoRaWAN technology is used for long-range transmission (up to 10 km) with low power consumption, while NB-IoT is employed for deep signal penetration in dense urban environments. The system utilizes the MQTT protocol over TLS/DTLS for secure and lightweight data transport. For data processing, a stream processing model (using tools like Apache Kafka) is implemented to filter noise and aggregate readings in real-time. The storage architecture combines Time-series databases (InfluxDB) for high-speed writing of metrological data and NoSQL databases (MongoDB) for managing metadata. The analytical component of the system leverages machine learning algorithms, specifically ARIMA and LSTM models, to forecast heat loads with an accuracy of  $\pm 5\%$ , and K-means clustering to detect anomalies such as leaks or unauthorized consumption.

The research concludes that the proposed architecture successfully solves the problem of interoperability between different equipment manufacturers through protocol unification. The combination of LoRaWAN and NB-IoT ensures reliable coverage and extends the autonomous operation of sensor nodes up to 30 days. The use of containerization (Docker) ensures the system's scalability to serve tens of thousands of devices. The implementation of predictive analytics allows for the optimization of boiler house operations, potentially reducing energy costs by 8–10%, which confirms the practical value and economic efficiency of the developed system.

**Keywords:** Internet of Things; heat energy monitoring; heat meters; LoRaWAN; NB-IoT; MQTT; data processing; information system architecture.

**Fig.:** 5. **References:** 18.